



Design Principles of
Steel Structure

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 土木工程类

钢结构设计原理

主编 刘智敏



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·土木工程类

钢结构设计原理

刘智敏	主 编
姜兰潮 陈爱国	副主编
杨 娜	主 审

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

钢结构设计原理是土木工程专业的一门专业基础课程。本书根据全国高等学校土木工程专业教学指导委员会对土木工程学生的基本要求和审定的教学大纲而编写。全书共分为6章,包括:绪论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。各章开头有章节概要、章节重点和难点。每章结束后有小结,并附有思考题和习题,便于教学使用。

本书可以作为高等学校土木工程及相关专业的教学用书,也可以用作继续教育的教材及土建设计和工程专业技术人员学习与参考用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/刘智敏主编. —北京:北京交通大学出版社,2012.10

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1231-5

I. ①钢… II. ①刘… III. ①钢结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第238896号

责任编辑:王晓春 特邀编辑:张瑞仁

出版发行:北京交通大学出版社 电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街44号 邮编:100044

印刷者:北京交大印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:22.25 字数:558千字

版 次:2012年11月第1版 2012年11月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1231-5/TU·98

印 数:1~3 000册 定价:45.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·土木工程类

编委会

顾问：施仲衡

主任：司银涛

副主任：张顶立 陈 庚

委员：（按姓氏笔画排序）

王连俊 毛 军 白 雁

李清立 杨维国 张鸿儒

陈 岚 朋改非 赵国平

贾 影 夏 禾 黄海明

编委会办公室

主任：赵晓波

副主任：贾慧娟

成员：（按姓氏笔画排序）

吴嫦娥 郝建英 徐 琤

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整，大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力，同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业，铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势，是最快捷、最可靠的运输方式，是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来，中国铁路积极适应社会的改革和发展，狠抓制度改革，着力技术创新，抓住了历史发展机遇，铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视，根据国家《中长期铁路网规划》（2005—2020年）：到2020年，中国铁路网规模达到12万千米以上。其中，时速200千米及以上的客运专线将达到1.8万千米。加上既有线提速，中国铁路快速客运网将达到5万千米以上，运输能力满足国民经济和社会发展需要，主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具，但随着城市建设和经济的繁荣，城市人口大幅增加，近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市，仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠，是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络，轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是，在我国轨道交通进入快速发展的同时，解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增长以及新技术的开发与引进，管理和技术人员队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训，对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校，拥有该学科一流的师资和科研队伍，为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来，学校非常重视轨道交通的研究和发展，建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室，“基于通信的列车运行控制系统（CBTC）”取得了关键技术研究的突破，并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题，北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”，以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、

运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会

2012年11月

出版说明

为促进高等轨道交通专业交通土建工程类教材体系的建设，满足目前轨道交通类专业人才培养的需要，北京交通大学土木建筑工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师，并在有关单位领导和专家的大力支持下，编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·土木工程类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂，实操部分图文并茂”的原则，侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者，本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式，配套有教学课件、习题库、自学指导书，并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导，在此表示深深的敬意和感谢。

本系列教材从2012年1月起陆续推出，首批包括：《材料力学》、《结构力学》、《土木工程材料》、《水力学》、《工程经济学》、《工程地质》、《隧道工程》、《房屋建筑学》、《建设项目管理》、《混凝土结构设计原理》、《钢结构设计原理》、《建筑施工技术》、《施工组织及概预算》、《工程招投标与合同管理》、《建设工程监理》、《铁路选线》、《土力学与路基》、《桥梁工程》、《地基基础》、《结构设计原理》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养，特别是轨道交通土木工程专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会

2012年11月

前 言

本书主要根据 GB 50017—2003《钢结构设计规范》编写，每章后面补充了《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10002.2—2005 的内容。其内容及教学要求符合《土木工程专业指导性规范》的要求。本书可以作为高等学校土建类（房建和桥梁）函授或夜大本科相关专业的教材或教学参考书，也可以作为土木工程专业技术人员与管理人士的参考用书。

钢结构设计原理主要讲述钢结构基本构件的受力性能和设计计算方法，是土木工程专业重要的专业基础课。本书内容主要包括钢结构材料的物理力学性能、钢结构的设计方法、钢结构的连接及基本构件（包括：轴心受力构件；受弯构件；拉弯和压弯构件）的受力性能分析、设计计算。由于本书增加了部分铁路桥梁的设计内容，通过本书的学习，可使学生掌握钢结构的基本理论和基本设计方法，为学习后续专业课程、毕业设计，以及毕业后从事土木工程领域相关工作（包括房建和铁路桥梁方面）打下坚实的基础。

本书在叙述方法上由浅入深，循序渐进，力求对基本概念论述清楚，使读者能较容易地掌握钢结构构件的力学性能及理论分析方法；突出应用，有明确的计算方法和实用设计步骤。书中有一定数量的计算例题，有利于理解和掌握设计原理。为了便于自学，每章均有小结、思考题和习题等内容。

本书由长期担任“钢结构设计原理”课程教学工作的教师共同编写。参加编写的人员有：北京交通大学杨娜，第 1 章；刘磊，第 2 章；刘智敏，第 3 章；姜兰潮，第 4 章；张勇，第 5 章；陈爱国，第 6 章。全书由刘智敏任主编，姜兰潮、陈爱国任副主编。

杨娜教授对本书进行了审阅，并提出了许多宝贵的意见，陈波和邢吉慧老师为本书做了大量工作，在此表示诚挚的谢意。

鉴于作者水平有限，书中难免有错误及不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1	第 4 章 轴心受力构件	119
1.1 钢结构的发展概况	1	4.1 概述	119
1.2 钢结构的特点与应用范围	7	4.2 轴心受力构件的强度和刚度	121
1.3 钢结构设计方法	11	4.3 轴心受压构件的整体稳定	124
1.4 钢结构设计的基本要求	14	4.4 轴心受压构件的局部稳定	135
1.5 钢结构的发展趋势	15	4.5 轴心受拉构件的设计	138
1.6 钢结构的深化设计	16	4.6 实腹式轴心受压构件的设计	141
第 2 章 钢结构的材料	17	4.7 格构式轴心受压构件	146
2.1 钢材的主要力学性能	17	4.8 柱头与柱脚	157
2.2 影响钢材力学性能的因素	22	4.9 《桥规》的相关计算规定	164
2.3 钢材的两种破坏形式	25	习题	166
2.4 应力集中对钢材性能的影响	26	第 5 章 受弯构件	168
2.5 钢材的疲劳破坏及疲劳计算	28	5.1 梁的类型和应用	169
2.6 钢的种类、代号与技术标准	33	5.2 钢梁的强度和刚度	173
2.7 钢材的选用原则	36	5.3 钢梁的整体稳定	179
思考题	36	5.4 钢梁的局部稳定和腹板加劲肋 设计	190
第 3 章 钢结构的连接	38	5.5 型钢梁的设计	199
3.1 钢结构的连接方法	38	5.6 组合梁的设计	201
3.2 钢结构的焊接方法和焊缝形式	45	5.7 《桥规》中梁的设计方法及规定	210
3.3 对接焊缝的构造和计算	51	思考题	214
3.4 角焊缝的构造和计算	60	习题	214
3.5 焊接残余应力与焊接残余变形	77	第 6 章 拉弯和压弯构件	216
3.6 普通螺栓连接的构造和计算	83	6.1 拉弯和压弯构件的应用及破坏 形式	216
3.7 高强度螺栓连接的性能和计算	96	6.2 拉弯和压弯构件的设计内容和 步骤	217
3.8 钢结构构件及连接设计的折减 系数	111		
3.9 《桥规》关于高强度螺栓的计算	111		
习题	112		

6.3 偏心受力构件的强度和刚度验算	218	附录 C 结构或构件的变形容许值	254
6.4 实腹式压弯构件的平面内和平面 外稳定性.....	221	附录 D 疲劳计算的构件和连接分类 ...	255
6.5 格构式压弯构件的设计.....	231	附录 E 常用型钢规格及截面特性	259
6.6 压弯构件的局部稳定.....	236	附录 F 各种截面回转半径的近似值 ...	318
6.7 《桥规》中拉弯和压弯构件的 计算方法.....	240	附录 G 柱的计算长度系数	320
6.8 压弯构件（框架柱）的计算长度	242	附录 H 型钢螺栓线距表	332
6.9 框架的梁柱连接.....	244	附录 I 基本容许应力（桥规）	335
习题	245	附录 J 容许应力折减系数（桥规） ...	337
附录 A 钢材和连接的强度设计值	247	附录 K 疲劳容许应力幅（桥规）	338
附录 B 轴心受压构件的稳定系数	250	附录 L 模拟试题	339
		L1 模拟试题 1	339
		L2 模拟试题 2	342
		参考文献	344

第 1 章

绪 论

【本章内容概要】

介绍钢结构特点和应用范围；钢结构设计原理和方法及可靠性的含义，极限状态的分类，荷载标准值、荷载设计值，强度标准值、强度设计值的含义；介绍有关钢结构的设计规范；讲述钢结构发展概况及发展方向。

【本章学习重点与难点】

学习重点：掌握钢结构的特点及应用范围；理解钢结构的设计方法，掌握两种极限状态实用表达式的应用。

学习难点：理解钢结构的设计方法。

1.1 钢结构的发展概况

钢结构是土木工程结构的主要形式之一，广泛应用于各类工程结构中。钢结构的广泛应用源自于钢材的优异性能、制作安装的高度工业化、结构形式的丰富多样化及对复杂结构的良好适应性等特点。特别是 21 世纪以来，随着科学技术的迅猛发展及人们对物质文化生活要求的不断提高，钢结构行业面临着飞速发展的机遇和挑战。新的结构形式、新的设计理念、新的计算分析理论、新的制作安装技术层出不穷，为钢结构的发展提供了前提和保障。

1.1.1 钢结构在我国的发展历史

最早的钢结构由铁结构发展而来。早在公元前 60 年前后，我国就修建了铁链桥。1706 年，桥长 100 m 的四川泸定大渡河铁索桥的建成不仅在我国具有铁制结构的标志性意义，也是世界上具有里程碑意义的铁制结构。改革开放后，我国钢结构的设计、制造和安装水平有了迅速提高，先后建成一批规模较大、技术较为先进的钢结构建筑，为我国钢结构的进一步发展奠定了坚实的技术基础。钢材的产量和质量不断提高，为工程建设中大量采用钢结构提供了充分的物质基础。2008 年奥运会和 2010 年世博会在我国的举办，更为钢结构在我国的发展提供了前所未有的历史契机。表 1-1~表 1-3 分别列出了新中国成立以来我国已建成的重要的钢结构桥梁和钢结构建筑。

表 1-1 国内重要的钢结构桥梁

工程名称	结构形式及主要技术指标	建成时间	用途
武汉长江大桥	连续梁桥, 9×128 m	1957	公铁
南京长江大桥	连续梁桥, 9×160 m	1968	公铁
九江长江大桥	系杆拱桥, 主跨 216 m	1992	公铁
上海杨浦大桥	斜拉桥, 跨度 602 m	1993	公路
香港青马大桥	悬索桥, 1 377 m	1997	公铁
江阴长江大桥	悬索桥, 主跨 1 385 m	1999	公路
南京二桥 (如图 1-1 所示)	斜拉桥, 跨度 628 m, 流线型钢箱梁	2000	公路
宜昌长江大桥 (如图 1-2 所示)	悬索桥, 主跨 960 m	2001	公路
卢浦大桥	中承式系杆拱桥, 主跨 550 m	2003	公路
润扬大桥	悬索桥, 主跨 1 490 m	2005	公路
杭州湾跨海大桥	斜拉桥, 主跨 448 m 的双塔双索面钢箱梁	2007	公路
苏通大桥	斜拉桥, 1 088 m, 钢箱梁	2007	公路
武汉天兴洲大桥 (如图 1-3 所示)	斜拉桥, 主跨 504 m	2009	公铁

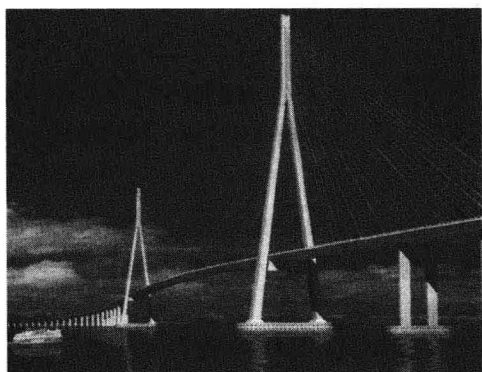


图 1-1 南京二桥

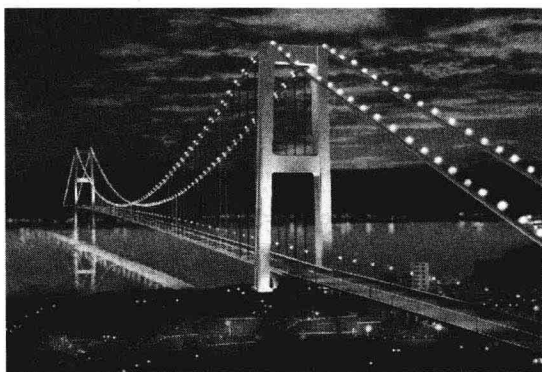


图 1-2 宜昌长江大桥



图 1-3 武汉天兴洲大桥

表 1-2 国内经典高层钢结构建筑

工程名称	城市	总建筑面积/ 10^4 m^2	层数	高度/m	建成时间
中环广场	香港	13	78	374	1993
中信广场	广州	29	80	391.1	1997
金贸大厦	上海	28.9	88	420.5	1998
中国银行大厦	香港	12.9	72	368	1998
国际金融中心二期	香港	20	90	415.8	2003
101大厦	台北	19.3	101	508	2004
中央电视台新台址 (如图 1-4 所示)	北京	55	45	230	2008
国贸三期	北京	54	75	330	2008
上海环球金融中心大厦 (如图 1-5 所示)	上海	38.16	101	492	2008

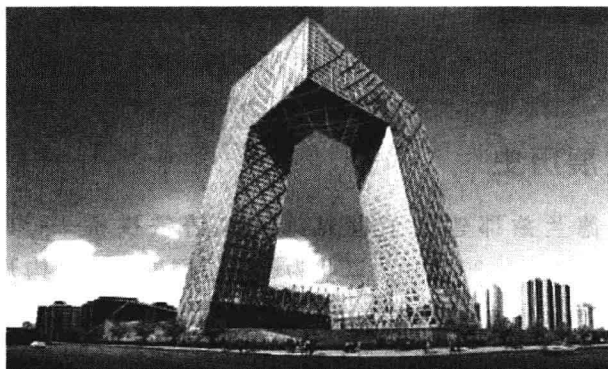


图 1-4 中央电视台新台址



图 1-5 上海环球金融中心大厦

表 1-3 国内经典大跨度钢结构建筑

工程名称	总建筑面积/ 10^4 m^2	结构形式及主要技术指标	建成时间
北京工人体育馆	8	车辐式双层索结构, 直径 94 m	1961
首都四机位机库	3.5	网架, 跨度 153 m	1996
国家大剧院	15	椭球形网壳, 东西方向。长轴长度为 212.20 m, 南北方向短轴长度为 143.64 m	2007
国家体育馆	8.09	双向张弦钢屋架结构, 南北跨度 144 m, 东西跨度 114 m	2007
国家体育场(鸟巢) (如图 1-6 所示)	25.8	格构式门式刚架, 长轴 340m, 短轴 292m	2008
北京工业大学羽毛球馆 (如图 1-7 所示)	2.8	弦支穹顶结构, 跨度 93 m	2008

续表

工程名称	总建筑面积/ 10^4m^2	结构形式及主要技术指标	建成时间
国家游泳中心(水立方)	6.5~8	网架, 跨度 177 m	2008
首都 A380 飞机维修机库	7	网架, 跨度 350.8 m	2008
首都机场三期	30	网壳, 长 950 m, 宽 750 m	2008



图 1-6 国家体育场(鸟巢)

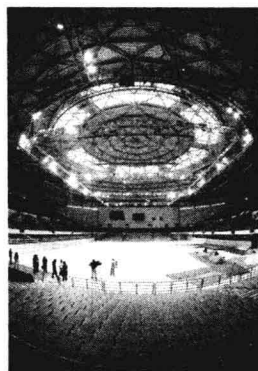


图 1-7 北京工业大学羽毛球馆

1.1.2 钢结构在国外的历史

英国 1779 年在英格兰中部西米德兰兹郡建成了世界第一座铸铁拱桥——雪纹 (Coalbrookdale) 桥, 如图 1-8 所示, 其跨度为 30.7 m。以此为起点, 国外的钢结构开始了快速发展。1890 年英国在爱丁堡城北福兹河 (Firth of Forth) 上建成了福兹双线铁路桥 (Forth Bridge), 主跨达 519 m, 是英国人引以为豪的工程杰作, 如图 1-9 所示。20 世纪 30 年代, 美国进入钢铁产业的迅猛发展时期, 钢铁产量和质量提高带动了钢结构突飞猛进的发展, 在纽约、芝加哥等城市建设了大量高层钢结构工程。表 1-4~表 1-9 列出了国外经典钢结构的工程概况。



图 1-8 雪纹桥

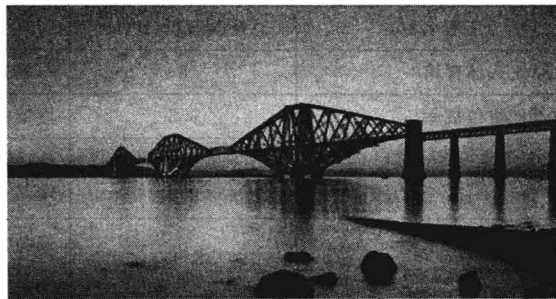


图 1-9 福兹桥

表 1-4 国外经典的桥梁钢结构工程

工程名称	结构形式及主要技术指标	地点	建成时间	用途
不列丹尼桥	锻铁箱形梁桥, 71.9+140+140+71.9 m	英国	1850	铁路
福兹桥	伸臂梁桥, 206+46+519+82+519+46+206 m	英国	1889	铁路
金门大桥	悬索桥, 跨径 1 280 m	美国	1937	公路
青津海峡桥	悬索桥, 主跨 1 780 m	日本	1980	公路
恒伯桥	悬索桥, 主跨 1 410 m	英国	1981	公路
南备赞濑户桥	悬索桥, 主跨 1 100 m	日本	1988	公铁
诺曼底桥	斜拉桥, 856 m	法国	1995	公路
大伯尔特桥	悬索桥, 主跨 1 624 m	丹麦	1996	公路
明石海峡大桥 (如图 1-10 所示)	悬索桥, 主跨 1 991 m	日本	1998	公路
多多罗大桥 (如图 1-11 所示)	钢混组合梁斜拉桥, 跨径 890 m	日本	1999	公路
墨西拿海峡大桥	悬索桥, 主跨 3 300 m	意大利	2011	公铁

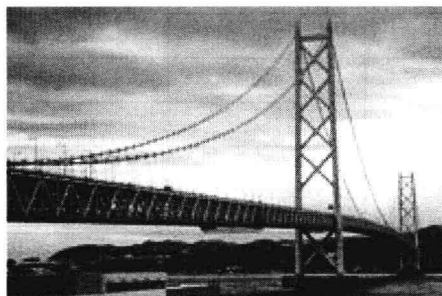


图 1-10 明石海峡大桥

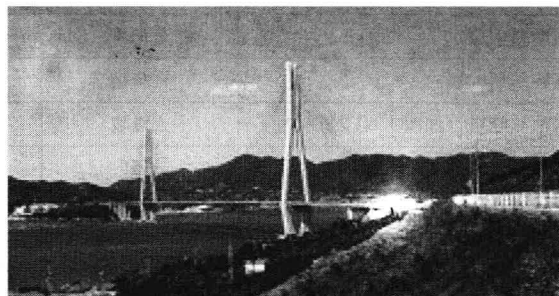


图 1-11 多多罗大桥

表 1-5 国外经典的大跨度钢结构工程

工程名称	城市	结构形式及主要技术指标	建成时间
新奥尔良体育馆	新奥尔良市	双层网壳, 直径 207.3 m	1976
多伦多天空穹顶	多伦多	开合钢结构屋顶, 跨度 208 m	1989
太阳海岸穹顶	圣彼得堡	索穹顶, 直径 210 m	1989
福冈体育馆 (如图 1-12 所示)	福冈	开合钢结构屋顶, 跨度 222 m	1993
日本名古屋穹顶	名古屋	单层球面网壳, 净跨为 1 872 m	1996
乔治亚穹顶	亚特兰大	索穹顶, 241 m×193 m	1996
千年穹顶 (如图 1-13 所示)	伦敦	索穹顶, 直径 320 m	1999
澳大利亚主体育场	悉尼	双曲抛物面网壳, 跨度 220 m	2000

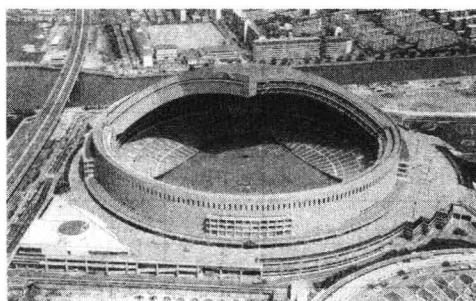


图 1-12 福冈体育馆

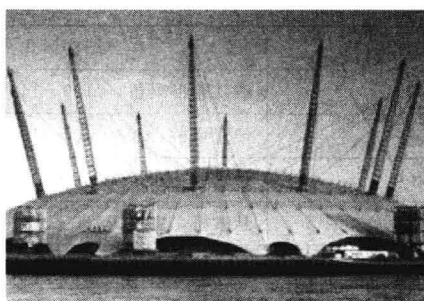


图 1-13 千年穹顶

表 1-6 国外经典的高层钢结构工程

工程名称	城市	层数	高度/m	建成时间
帝国大厦	纽约	102	381	1931
约翰·汉考克大厦	芝加哥	100	344	1969
世界贸易中心	纽约	110	410	1973
西尔斯大厦	芝加哥	108	443	1974
阿摩珂大厦	芝加哥	83	346	1983
佩特纳斯大厦	吉隆坡	88	452	1996
国油双峰塔 (如图 1-14 所示)	吉隆坡	95	452	1997
迪拜塔 (如图 1-15 所示)	迪拜	162	828	2010
国际商务中心	首尔	130	580	在建

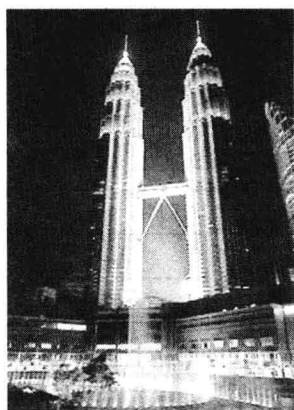


图 1-14 国油双峰塔

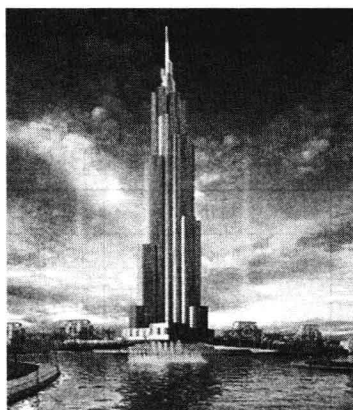


图 1-15 迪拜塔

1.2 钢结构的特点与应用范围

1.2.1 钢结构的特点

钢结构是用钢板、热轧型钢或冷加工型钢制造而成的。与其他材料的结构相比，钢结构具有如下特点。

1. 轻质高强，承载能力大

与混凝土、木材等其他结构材料相比，钢材的密度虽然较大，但其强度较其他结构材料高得多，从而使钢结构具有较大的承载能力。钢材的强度与密度的比值远大于混凝土和木材。因此，在承受同样荷载（尤其是拉力）时，与混凝土结构和木结构相比，钢结构构件的截面面积较小、自重较轻。

2. 钢材材性好，可靠性高

钢材在冶炼和轧制过程中质量可以得到严格控制，材质波动范围小。钢材质地均匀，各向同性，弹性模量大，具有良好的塑性和韧性，可近似看作理想弹塑性体，符合目前采用结构计算方法的基本概念和假定的条件要求，从而使钢结构的分析计算理论能够较好地反映结构的实际工作性能，可靠性高。

3. 工业化程度高

结构钢具有良好的冷、热加工性能，便于在专业化工厂进行生产和机械加工，再运输到现场安装。钢结构工厂制造、现场安装的施工方法既能保证加工和施工精度，又能有效缩短施工周期。同时，钢结构的工业化生产也为降低工程造价、提高经济效益创造了有利条件。

4. 抗震性能好

钢材具有良好的塑性和韧性，钢结构自重轻且结构体系轻盈，受到的地震作用较小，因此在国内外的历次地震中，钢结构均是损坏程度最小的结构。国际上已公认，钢结构是抗震设防区特别是强震区最适宜的结构类型。

5. 气密水密性好

结构钢本身具有优良的气密、水密性，而钢构件之间的连接又可以实现完全封闭。同时，钢结构在其使用周期内不易因温度等作用出现裂缝，具有较好的耐久性。因此，钢结构容易达到工程或工业所需的密闭性要求。

6. 易于锈蚀

铁元素易与氧及其他非金属元素发生氧化反应，致使钢结构在一般自然环境中极易锈蚀，需经常进行防腐养护，维护费用昂贵，这是钢结构的最大弱点。但是，在没有腐蚀性介质的一般建筑结构中，钢构件经过彻底除锈、喷涂防腐涂料后，锈蚀问题并不严重；对于湿度大或有侵蚀性介质环境中的钢结构，可采用耐候钢或不锈钢解决其易于腐蚀的问题。

7. 耐热性好，耐火性差

钢材耐热，但不耐火。当环境温度在 250℃ 以内时，钢材强度变化很小；当环境温度超